氮、磷、钾肥对绣球‘花手鞠’容器苗生长及养分状况的影响

汪雪影[1]，胡永红[2,3]，张宪权[2,3]，秦 俊[2,3*]，刘群录[1*]

（1. 上海交通大学设计学院，上海 200240；2. 上海辰山植物园，上海 201602；3. 上海城市树木生态应用工程技术研究中心，上海 200020）

摘要：为指导绣球容器苗的合理施肥，该研究以两年生盆栽绣球‘花手鞠’（*Hydrangea macrophylla* ‘Hanatemari’）为材料，利用“3414”平衡施肥设计，研究了氮（N）、磷（P）、钾（K）三种肥料的四个水平（N、K_2O：0、4、8、12 g $plant^{-1}$；P_2O_5：0、1.5、3、4.5 g $plant^{-1}$）对‘花手鞠’生长及植物养分状况的影响，并利用临界浓度法确定适宜的施肥量，为绣球容器苗的科学施肥提供依据。结果表明：(1) 在N肥处理中‘花手鞠’苗高、蓬径、植物生长指数（PGI）、地上部分及全株生物量均随施肥量升高呈上升趋势，当施肥量超过“2”水平时这些指标变化不再显著，或略有下降。(2) 低水平P肥（P1）和低水平K肥（K1）有利于‘花手鞠’生物量的积累。(3) 绣球叶片和茎中的养分含量均随N、P、K施肥量的增加而升高；而根系中K含量随K肥水平的升高变化不显著，与对照无显著差异。(4) 根据临界浓度法确定‘花手鞠’叶片中N和P的适宜范围分别为35.31~46.64 g kg^{-1}和1.88~2.28 g kg^{-1}。综合考虑养分含量、植物生长指标及生产成本，盆栽绣球N、P、K肥适宜的用量为N2（8 g N $plant^{-1}$）、P1（1.5 g P_2O_5 $plant^{-1}$）和K1(4 g K_2O $plant^{-1}$)。

关键词：绣球‘花手鞠’，氮磷钾，“3414”平衡施肥，生长，养分含量

中图分类号：Q945.1; S688.9 **文献标识码：**A

Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the growth and nutrient status of potted *Hydrangea macrophylla* ‘Hanatemari’

基金项目：上海市绿化和市容管理局 2019 年科学技术攻关项目（G192402）[Supported by Science and Technology Research Project of Shanghai Greening and City Appearance Administration in 2019 (G192402)]。

作者简介：汪雪影（1997-），硕士研究生，主要从事风景园林植物研究，（E-mail）xueying_wangwsn97@sjtu.edu.cn。

*通信作者：刘群录，博士，副教授，主要从事风景园林植物研究，（E-mail）liuql@sjtu.edu.cn。

*通信作者：秦俊，博士，教授级高级工程师，主要从事园林植物及应用研究，（E-mail）qinjun03@ 126.com。

WANG Xueying[1], HU Yonghong[2,3], ZHANG Xianquan[2,3], QIN Jun[2,3*], LIU Qunlu[1*]

(1. *School of Design*, *Shanghai Jiao Tong University*, Shanghai 200240, China; 2. *Shanghai Chen Shan Botanical Garden*, Shanghai 201602, China; 3. *Shanghai Engineering Research Center of Urban Tree Ecology and Applications*, Shanghai 200020, China)

Abstract: In order to guide the rational fertilization of potted *Hydrangea macrophylla*, the effects of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) at 4 levels (N, K_2O: 0, 4, 8, 12 g $plant^{-1}$; P_2O_5: 0, 1.5, 3, 4.5 g $plan^{-1}$) on the growth and nutrient status of two-year-old potted *H. macrophylla* ‘Hanatemari’ were investigated by the balanced fertilization design of “3414” method. The optimal fertilizer rate was determined by critical concentration method to provide evidence for rational fertilization of potted ‘Hanatemari’. The results were as follows: (1) N fertilization treatments, all of the seedling height, canopy diameter, plant growth index (PGI), aboveground and whole plant biomass of ‘Hanatemari’ increased with the increasing of N fertilizer application rate, while these parameters did not change significantly or slightly decreased as the N fertilizer rate exceeded level 2. (2) Low level of P (P1) and K (K1) were beneficial to the biomass accumulation of ‘Hanatemari’. (3) The nutrient contents in leaves and stems of ‘Hanatemari’ increased with the increasing of N, P and K fertilizer rates. However, the contents of K in roots did not change significantly with the increasing of K fertilizer levels, and there was no significant differences from the control. (4) According to the critical concentration method, the suitable contents of N in ‘Hanatemari’ leaves ranged from 35.31 to 46.64 g kg^{-1}, and for P ranged from 1.88 to 2.28 g kg^{-1}. Considering nutrient content, PGI and production cost, the optimal fertilizer rates of N, P and K were N2 (8 g N $plant^{-1}$), P1 (1.5 g P_2O_5 $plant^{-1}$) and K1 (4 g K_2O $plant^{-1}$), respectively.

Keywords: *Hydrangea macrophylla* ‘Hanatemari’, nitrogen, phosphorous and potassium, “3414” balanced fertilization plan, growth, nutrient content

绣球（*Hydrangea macrophylla*）为绣球花科（Hydrangeaceae）绣球属（*Hydrangea*）落叶灌木，其花色丰富，花序硕大，是广为大众所喜爱的一种观赏植物（赵冰，2016；陈有民，2017；Alexander, 2017）。为满足市场对盆栽绣球苗的需求，加速优质种苗的生产，合理施肥是一个重要的生产措施。

施肥是改变植物体内养分含量和生长发育的有效措施（张文君，2012）。其中氮（N）、磷（P）、钾（K）是园林植物生长发育中的三大必须营养元素（Katsuya et al., 2017）。三种

肥料的合理配施可以促进植物生长发育及植株抗病能力，进而提高园林植物的观赏和经济价值（王华荣和马文婷，2012）。朱报著等（2020）对杜鹃红山茶（*Camellia azalea*）苗期元素进行了诊断，发现杜鹃红山茶对 N 肥和 K 肥的反应比对 P 肥更为敏感。刘晨等（2019）在微型月季（*Rosa chinensis minima*）上的研究结果表明，在不同肥料模式处理下其营养元素含量、生长指标等显著提高，观赏品质也有所提升。在切花菊‘秦怀玉莲’（*Chrysanthemum morifolium* ‘Qinhuaiyulian’）的试验中，不同水平的 N、P、K 处理中 N2P1K2 和 N3P2K1 是适宜的处理，切花菊的生长品质和养分有效利用率都较好（方馨妍等，2020）。因此，肥料的合理用量与配施可直接影响植物生长、养分含量等指标，提高园林植物观赏和经济价值，有利于园林植物的栽培养护，而不合理的肥料用量会抑制生长。

近年来与绣球相关的研究多集中在花色相关基因的表达分析（陈旦旦等，2020；薛超，2020）、新品种快速繁殖（郭超，2015）、铝胁迫（李叶华等，2020）、切花保鲜（杨景雅等，2018）等方面。施肥的相关研究主要集中在商品肥料对切花品质的影响（王培等，2019），N 肥对绣球生长和养分吸收的影响（Bi et al., 2008；Li et al., 2019），缓释 P 肥对绣球生长的影响（Shreckhise et al., 2019），N 和 K 水平及交互作用对切花绣球生长和开花影响的田间实验（Thaneshwari & Gupta, 2017）。而定量研究 N、P、K 三种肥料的施肥效应，特别是盆栽绣球的养分研究还相对欠缺，这一定程度上制约了绣球规模化生产和应用。

“3414”施肥试验设计已经广泛应用于农作物的施肥研究中，在园林植物中也开始有所应用（张文君等，2009；金冬雪等，2021）。此试验设计可进行单因素和多因素肥料效应分析，确定植物 N、P、K 肥的适宜用量。本试验的材料为‘花手鞠’（*Hydrangea macrophylla* ‘Hanatemari’），是引自日本的优良品种，在实践中有较多应用。该品种具有重瓣、花序直立、不易倒伏的优良性状（陆文佳，2018），还具有较强的抗性（潘月等，2021；凌瑞等，2021）。本试验采用“3414”试验设计，研究 N、P、K 肥对盆栽绣球生长和养分浓度的影响，探究施肥与植株生长和各器官养分浓度的关系，确定绣球代表品种‘花手鞠’最适的 N、P、K 施用水平，旨在为盆栽条件下绣球养分管理及 N、P、K 精准配方施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本次施肥试验于 2020 年 3 月至 2020 年 8 月在上海辰山植物园隔离苗圃内（121°48′ E，31°22′ N）展开，场地位于上海市西南部的松江区，属于亚热带季风气候，年均气温 18.5 ℃，

试验期间苗圃的温度范围为 8~36 ℃。

供试材料为‘花手鞠’（ *Hydrangea macrophylla* ‘Hanatemari’）两年生苗，购于杭州画境种业公司。栽植容器的上口直径 26 cm，下口直径 20 cm，高度 26 cm，基质填充深度 20 cm。盆栽基质为田园土：草炭：珍珠岩 = 3：6：1（体积比）（李向林，2004）。基质的基本理化性质为 pH6.68，全 N 30.03 mg kg^{-1}、全 P 8.31 mg kg^{-1}、全 K 654.07 mg kg^{-1}、碱解 N 13.93 mg kg^{-1}、速效 P 1.36 mg kg^{-1}、速效 K 14.99 mg kg^{-1}。试验所用 N 肥为尿素（含 N 46.6%），P 肥为过磷酸钙（含 P_2O_5 14.5%），K 肥为硫酸钾（含 K_2O 54.1%），购于国药集团，均为化学分析纯。根据植物的生长节律和肥料的物理性质，N 肥和 K 肥分七次，溶于水后施入，施肥间隔约为 15 d。P 肥分三次，固体施入，其中第一次作为基肥施入总 P 肥量的 50%，后两次分别在初花期和盛花期，各施入 25%。为了防止雨水等其他环境因素造成的肥料流失等问题，盆栽苗底部配有托盘，全部置于四周通风的透明塑料棚下，覆以 50%遮荫率的遮荫网。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

采用“3414”肥料试验设计，N、P、K 三个因素，每个因素有“0、1、2、3”四个水平，共计 14 个处理（表 1）。其中“2”水平是试验预设的最佳施肥量，“1”水平为“2”水平的一半，“3”水平为“2”水平的 1.5 倍（王圣瑞等，2002）。采用随机区组设计，每个处理设置 3 个重复，每个重复 10 株苗，共计 420 株。具体每个施肥处理的试验设计和肥料用量见表 1。

表 1 “3414”施肥试验设计与肥料用量（单位：g 株$^{-1}$）

Table 1 “3414” fertilization experimental design and fertilizer dosages (Unit: g plant^{-1})

编号	处理	肥料水平 Fertilization level			施肥量 Fertilizing amount (g plant^{-1})		
No.	Treatment	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
T1	$N_0P_0K_0$	0	0	0	0.00	0.00	0.00
T2	$N_0P_2K_2$	0	2	2	0.00	3.00	8.00
T3	$N_1P_2K_2$	1	2	2	4.00	3.00	8.00
T4	$N_2P_0K_2$	2	0	2	8.00	0.00	8.00
T5	$N_2P_1K_2$	2	1	2	8.00	1.50	8.00
T6	$N_2P_2K_2$	2	2	2	8.00	3.00	8.00

编号 No.	处理 Treatment	肥料水平 Fertilization level			施肥量 Fertilizing amount (g plant^{-1})		
		N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
T7	$N_2P_3K_2$	2	3	2	8.00	4.50	8.00
T8	$N_2P_2K_0$	2	2	0	8.00	3.00	0.00
T9	$N_2P_2K_1$	2	2	1	8.00	3.00	4.00
T10	$N_2P_2K_3$	2	2	3	8.00	3.00	12.00
T11	$N_3P_2K_2$	3	2	2	12.00	3.00	8.00
T12	$N_1P_1K_2$	1	1	2	4.00	1.50	8.00
T13	$N_1P_2K_1$	1	2	1	4.00	3.00	4.00
T14	$N_2P_1K_1$	2	1	1	8.00	1.50	4.00

1.2.2 生长指标的测定及计算

苗木的高和蓬径于最后一次施肥半个月（8 月 4 日）后进行测定。测定蓬径时选择两个垂直方向，其中一个为最宽的方向，求其平均值。

每个处理取生长良好的植株 6 株，共取样 84 株，进行叶、茎、根生物量的测定。

地上部分生物量=叶生物量+茎生物量；

植物生长指数（PGI）=（株高+蓬径 1+蓬径 2）/3；

根冠比=地下部分生物量/地上部分生物量。

1.2.3 养分含量测量

将烘干后的根、茎、叶干样分别研磨，过 100 目筛，称取 0.2 g。浓硫酸消解，用凯式定氮仪测定植物样品中的 N 含量（Kjeltec 8100，FOSS 公司，丹麦）。用浓硝酸消解过滤后，采用原子吸收光谱仪（PE 公司，美国）对植物叶、茎、根中的全 P、全 K 进行测定。

1.3 数据分析

采用 Excel 2019 对原始数据进行初步整理；运用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析（ANOVA），并进行 Duncan 多重比较及 Person 相关性分析。采用 Origin Pro 8.5 绘图。

根据植株生物量和叶片 N、P、K 含量拟合一元二次方程，并进行显著性检验。计算 95%最大植株生物量对应的各器官养分含量，应用临界浓度法确定‘花手鞠’推荐施肥量范围（李毓琦等，2021）。

2 结果与分析

2.1 施肥对‘花手鞠’苗木生长的影响

N 肥处理的株高随施肥量增加呈递增趋势，均显著高于对照处理（*P*<0.05），并在 N3 水平取得最大值，但与 N1 和 N2 处理差异不显著（*P*>0.05）。随着施肥量的增加，蓬径和 PGI 呈先升高后降低的趋势。除 N0 处理外，其他 N 肥处理均能显著提高植株蓬径和 PGI（*P*<0.05），并在 N2 水平达到最大值，分别比对照高 87.04%和 86.03%。N 肥的施用显著提高了‘花手鞠’地上部分和整株生物量（*P*<0.05），且均在 N3 处理取得最大值，“2”、“3”水平间差异不显著（*P*>0.05）。随着 N 肥用量的增加，根冠比呈递减趋势，除 N0 处理根冠比显著高于对照外（*P*<0.05），其他处理根冠比均显著低于对照处理（*P*<0.05），说明施用 N 肥使养分更多地向地上部分分配，从而增加地上部分生物量，但在一定 N 肥用量的范围内（N0~N2）根系生物量并未显著增加（*P*>0.05），从而导致根冠比下降（表 2）。

随着 P 肥用量的增加，植株苗高、PGI、地上部分生物量及植株生物量均呈先上升后下降的趋势，且均在 P1 水平取得最大值，较对照分别高出 117.65%、102.86%、218.26%和 143.60%。与空白对照相比，P 肥处理的根冠比显著降低（*P*<0.05）；而在各含 P 处理间无显著差异（*P*>0.05）。说明 P 肥用量不是影响‘花手鞠’养分分配的关键因素。

不同 K 肥用量对株高、蓬径、PGI、根冠比均无显著影响（*P*>0.05）。说明在试验条件下，K 肥用量不是影响‘花手鞠’生长的一个重要因素。

表 2 不同水平氮、磷、钾施肥处理间‘花手鞠’生长比较

Table 2 Comparisons of different growth performances of *Hydrangea macrophylla* ‘Hanatemari’ under different fertilization levels of N, P and K

处理 Treatment	苗高 Height (cm)	蓬径 Diameter (cm)	植物生长指数 Plant growth index (PGI)	生物量 Biomass (g)			根冠比 Root/shoot ratio
				地上部分 Above-ground biomass	地下部分 Below-ground biomass	总生物量 Total biomass	
T1(CK)	22.67±2.19c	41.17±0.33c	35.00±0.51c	35.59±2.33c	15.12±1.09a	50.72±3.21b	0.43±0.02b
T2(N0)	32.00±1.53b	43.83±1.86c	39.89±1.25c	25.4±1.65c	14.83±1.96a	40.23±3.59b	0.58±0.04a
T3(N1)	41.33±0.88a	66.17±1.09b	57.89±0.87b	86.44±4.69b	18.73±1.62a	105.17±6.29a	0.22±0.01c
T6(N2)	41.33±1.20a	77.00±4.31a	65.11±3.07a	99.71±5.53ab	13.08±3.06ab	112.79±7.62a	0.13±0.03cd
T11(N3)	42.67±0.33a	75.00±3.62a	64.22±2.31a	105.47±5.94a	8.09±1.94b	113.55±5.94a	0.08±0.02d
T1(CK)	22.67±2.19c	41.17±0.33b	35.00±0.51b	35.59±2.33c	15.12±1.09a	50.72±3.21c	0.43±0.02a
T4(P0)	39.00±2.08b	78.83±2.03a	65.56±2.02a	92.77±1.31b	8.60±1.89b	101.37±2.26b	0.09±0.02b
T5(P1)	49.33±1.45a	81.83±2.19a	71.00±2.22a	113.26±3.35a	10.29±0.68ab	123.55±3.76a	0.09±0.01b
T6(P2)	41.33±1.20b	77.00±4.31a	65.11±3.07a	99.71±5.53b	13.08±3.06ab	112.79±7.62ab	0.13±0.03b
T7(P3)	41.33±2.40b	77.33±5.95a	65.33±4.70a	89.69±4.12b	11.78±1.48ab	101.47±2.65b	0.13±0.02b
T1(CK)	22.67±2.19b	41.17±0.33b	35.00±0.51b	35.60±2.33d	15.12±1.09a	50.72±3.21d	0.43±0.02a
T8(K0)	41.33±1.86a	75.00±2.02a	63.78±1.74a	90.30±2.36c	12.93±1.30a	103.23±1.08c	0.14±0.02b
T9(K1)	38.67±2.03a	76.50±2.75a	63.89±2.50a	124.53±3.14a	12.29±0.62a	136.82±2.57a	0.10±0.01b
T6(K2)	41.33±1.20a	77.00±4.31a	65.11±3.07a	99.71±5.53bc	13.08±3.06a	112.79±7.62bc	0.13±0.03b
T10(K3)	45.67±3.48a	84.17±3.67a	71.33±3.53a	112.46±9.05ab	13.09±0.80a	125.55±9.85ab	0.12±0.01b

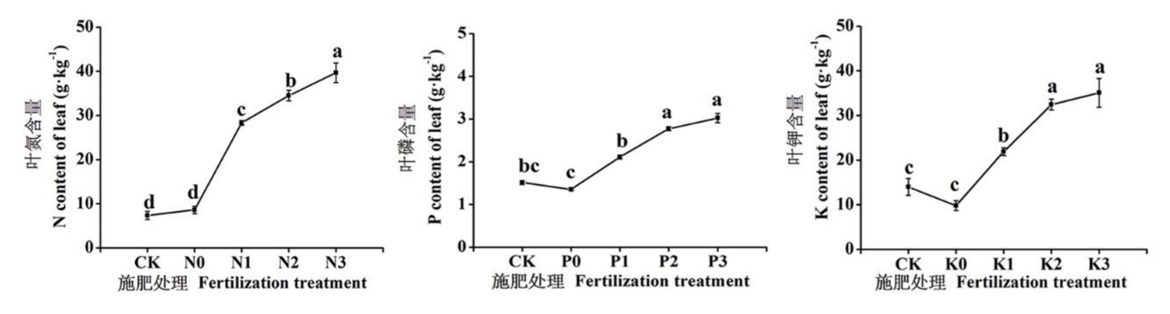
注：同列不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

2.2 施肥对‘花手鞠’叶、茎、根养分含量的影响

2.2.1 施肥对‘花手鞠’叶片养分含量的影响

随着 N、P、K 肥用量的增加，‘花手鞠’叶中相应的养分含量随之增加，均在“3”水平取得最大值。与 0 水平相比，N3 处理的叶片 N 含量提高了 361.51%，P3 处理的 P 含量提高了 123.47%，K3 处理的 K 含量提高了 258.19%。方差分析结果表明，除“0”水平外，其他水平施肥处理的叶片养分含量均显著高于空白对照（$P<0.05$）。叶片 P 和 K 含量在“2”和“3”水平时差异不显著（$P>0.05$），而叶片 N 含量在各水平间均有显著差异（图 1）。



处理间不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）；误差线根据标准误绘制。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments（$P<0.05$）; Error bars represent standard errors. The same below.

图 1 施肥处理下‘花手鞠’叶片中的养分含量

Fig. 1 Nutrient contents of *Hydrangea macrophylla* ‘Hanatemari’ leaves under different fertilizer treatments

2.2.2 施肥对‘花手鞠’茎中养分含量的影响

‘花手鞠’茎中营养元素含量如图 2 所示。随着肥料用量的增加，茎中相应元素的含量呈递增趋势。茎中 N、P 含量在“2”、“3”水平间差异不显著（$P>0.05$）。茎中 N、P、K 含量的最大值分别为 27.33、3.77、22.62 g·kg^{-1}，与对照相比分别提高了 468.08%、315.2%和 104.40%。

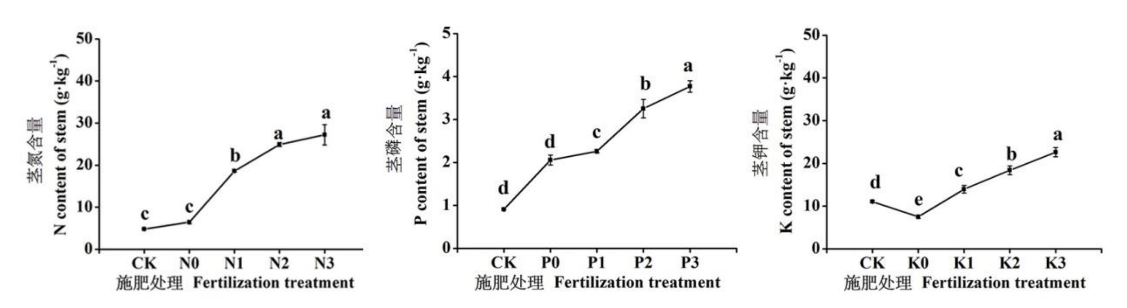


图 2 施肥处理‘花手鞠’茎中养分含量

Fig. 2 Nutrient contents of *Hydrangea macrophylla* ‘Hanatemari’ stems under different fertilizer treatments

2.2.3 施肥对‘花手鞠’根养分含量的影响

根中的 N 含量在 N0 处理与对照处理间无显著差异（P>0.05），其他 N 肥处理则显著高于对照（P<0.05），N2 与 N3 水平间无显著差异（P>0.05）。根中 P 含量随 P 肥用量增加呈上升趋势，在 P2 水平达到最高值，P2 和 P3 处理间无显著差异（P>0.05），但均显著高于对照（P<0.05）。K0~K3 处理的根 K 含量均低于对照，K 肥的用量变化对根系中 K 含量无显著影响（P>0.05）（图 3）。

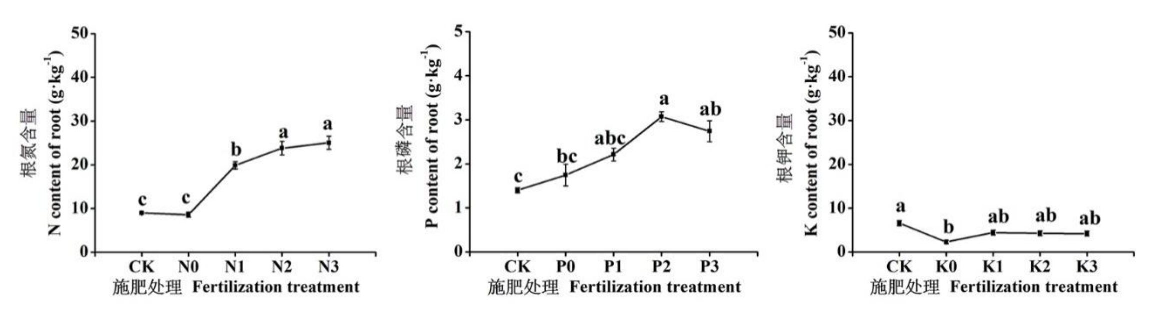


图 3 施肥处理‘花手鞠’根中养分含量

Fig. 3 Nutrient contents of *Hydrangea macrophylla* ‘Hanatemari’ roots under different fertilizer treatments

2.3 ‘花手鞠’适宜施肥量的确定

利用‘花手鞠’叶片中 N、P、K 含量与生物量及 PGI 绘制散点图，并拟合养分指标与生物量和 PGI 的一元二次方程（图 4）。由图 4、表 3 所示方程和显著性检验结果综合判断，六个方程中叶片 N 含量与植株生物量及 PGI、P 含量与植株生物量的模型拟合成功，适合作为确定适宜施肥量范围的依据。以这两条养分含量与生物量抛物线上最大生物量的 95%对应的叶片养分含量作为最适含量范围和临界值，得出‘花手鞠’苗木叶片 N、P 含量的临界值分别为 35.31、1.88 g kg^{-1}，N 和 P 的最适含量范围分别为 35.31 ~ 46.64 g kg^{-1} 和 1.88 ~ 2.28 g kg^{-1}。根据叶片 N、P 含量推断绣球‘花手鞠’的最适施 N 量范围为 N2~N3（8 ~ 12 g N $plant^{-1}$）、适宜 P 肥用量为 P1（1.5 g P_2O_5 $plant^{-1}$）。K 肥相关方程拟合的曲线关系均不显著（P>0.05），故无法确定 K 肥的用量范围，本试验中设计的 K 肥用量均未达到抑制生长植株生长的程度。

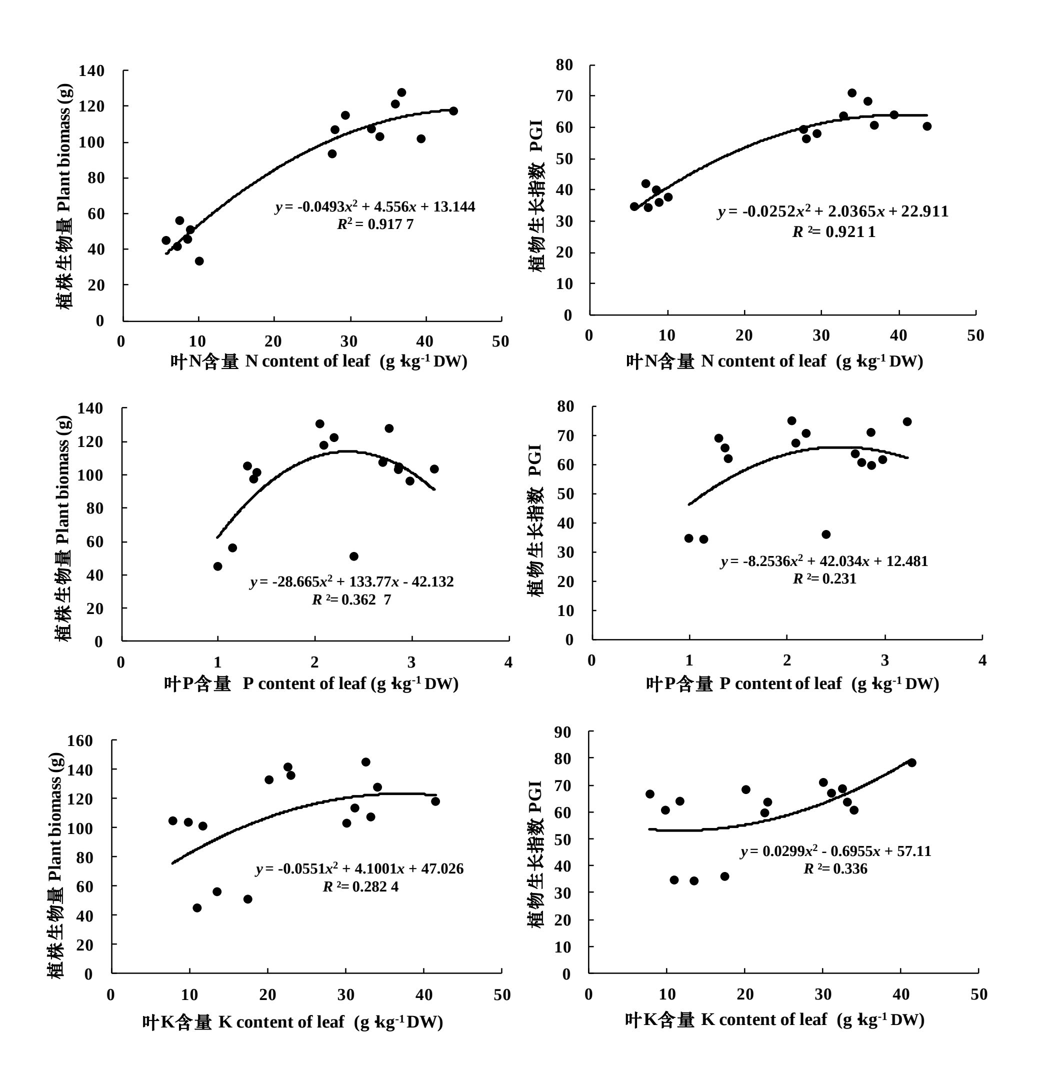


图 4 ‘花手鞠’叶中 N、P、K 含量与生物量和植物生长指数的关系

Fig.4 Quadratic relationships between biomass or PGI and leaves nutrient contents in *Hydrangea macrophylla* ‘Hanatemari’ seedlings

表 3 绣球‘花手鞠’叶片 N、P、K 含量与生物量及 PGI 的回归方程

Table 3 Regressive equations between biomass or PGI and N, P, K contents of leaves in *Hydrangea macrophylla* ‘Hanatemari’

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	回归方程（n=12） Regressive equation	R 方值 R value	显著性 Significance
生物量 Biomss Y_1	N	Y_1=-0.046N^2+4.293N+18.319	0.959	P<0.01
	P	Y_1=-38.827P^2+177.154P-80.009	0.752	P<0.01
	K	Y_1=-0.046K^2+4.293K+18.319	0.403	P>0.05
植物生长指数 PGI Y_2	N	Y_2=-0.025N^2+2.030P+23.456	0.915	P<0.01
	P	Y_2=-13.600P^2+66.108P-9.202	0.506	P<0.05
	K	Y_2=-0.004K^2+0.974K+39.941	0.415	P>0.05

3 讨论

N 是叶绿素、核酸等的植物体内重要物质的组成成分，对植物的生长发育具有重要作用。绣球分枝数量多、生长旺盛，决定了其对 N 的需求量大（Thaneshwari & Gupta, 2017）。在本研究中，N 肥显著促进了‘花手鞠’的生长。在一定 N 肥用量范围内，株高、PGI 等生长指标随 N 肥用量的增加呈递增趋势。N2 和 N3 水平生长指标间差异不显著，即当 N 肥用量从每株 8 g 增加至每株 12 g 时，对‘花手鞠’的促生长作用不再显著。绣球‘梅里特至尊’的施肥实验中也有相似的结果，各生长指标值在高 N 肥处理中显著优于低 N 肥处理，但 15、20 mmol·L^{-1} 用量下 PGI、干重等差异不显著（Li et al., 2019）。此类结果在杜鹃花（*Rhododendron* ‘Cannon’s Double’）中也有报道（Bi et al., 2007）。

P 是核酸、能量物质、辅酶等的重要组成成分，可以促进蛋白质、纤维素等的合成，是促进植物生长发育的“品质元素”。在本研究中 P 肥对绣球‘花手鞠’的株高和全株生物量有显著促进作用，均在 P1 水平达到最大值。而 P 肥仅对灯盏花株高有显著影响，对植株鲜重影响不显著（赵峥等，2005）；对空气凤梨 P 肥仅增加了其叶面积（王姗等，2014）。说明不同植物对 P 肥有不同的响应。

K 参与蛋白质的合成、蛋白质和碳水化合物的代谢，也参与快速细胞分裂和分化。K 肥施用对绣球生长具有显著促进作用，全株生物量在低水平 K 处理（K1）中取得最大值。Thaneshwari & Gupta（2017）也发现适量的 K 肥可促进绣球的生长。陈洪国（2009）在桂花的施肥研究中发现，K 肥的过量使用，会影响其他养分吸收，进而使得养分平衡失调，影响开花品质。因此，在施用足量 N 肥的同时，要适量配施 K 肥和 P 肥。

养分含量是评价植物生长的重要指标（Graciano et al., 2006；Oliet et al., 2009）。叶片能明显反映养分供应情况，在营养诊断中叶片的营养状况是最重要的量化指标（唐菁等，2005）。‘花手鞠’叶片 N 含量随施肥水平升高而显著增加。P、K 处理中叶片中的相应元素含量在“2”、“3”水平间差异不显著，说明“2”水平的 P、K 施肥量可满足‘花手鞠’对 P、K 的需求。

本研究中，当 N 肥用量超过“2”水平后，再增加 N 肥用量，养分浓度升高，生物量不再显著增加；随着 P 肥用量增加，养分含量递增，但生物量在超过 P1 水平后产生极显著下降，K 肥与 P 肥有相似的规律，也在 K1 水平处出现生物量的转折点。这可用 Timmer（1997）提出的稳态营养模型理论进行解释。在“贫养期”（dificiency），植物的生物量和体内的养分积累量均随施肥增加而增加，逐渐达到养分充足（sufficiency）状态。此后，持续提供养分，

生物量增加不再显著，进入平台期，而植物体内养分浓度持续升高。此时植物进入“奢养消耗”（luxury consumption）阶段，在此阶段植株积累了充足的营养，可提高植物的抗逆能力及移栽成活率。继续提供养分，则会造成养分过多，产生“养分毒害”（toxicity）。

4 结论

根据施肥对盆栽绣球生长的影响，进行模型拟合，并结合肥料经济效益和环保因素考虑，两年生‘花手鞠’盆栽苗的 N、P、K 肥适用量分别确定为 N2（8 g N plant^{-1}）、P1（1.5 g P_2O_5 plant^{-1}）和 K1（4 g K_2O plant^{-1}）。

参考文献：

ALEXANDER L, 2017. Production of triploid *Hydrangea macrophylla* via unreduced gamete breeding [J]. Hortic Sci, 52(2): 221-224.

BI GH, SCAGEL CF, FUCHIGAMI LH, et al., 2007. Rate of nitrogen application during the growing season alters the response of container-grown rhododendron and azalea to foliar application of urea in the autumn [J]. J Hortic Sci Biotechnol, 82(5): 753-763.

BI GH, SCAGEL CF, HARKESS R, 2008. Rate of nitrogen fertigation during vegetative growth and spray applications of urea in the fall alters growth and flowering of florists' hydrangeas [J]. Hortic Sci, 43(2): 472-477.

CHEN DD, LI M, PENG JQ, et al., 2020. Association between *HmDFR* gene expression and flower color of *Hydrangea macrophylla* [J]. Plant Physiol J, 56(7): 1641-1649. [陈旦旦，李萌，彭继庆，等，2018. *HmDFR* 基因表达与绣球花花色的关联分析[J]．植物生理学报，56(7):1641−1649.]

CHEN HG, 2009. Effects of different fertilization treatments on the growth, flower production and photosynthesis of *Osmanthus fragrans* Lour. [J]. Acta Hortic Sin, 6(6): 843-843. [陈洪国，2009. 氮磷钾肥处理对桂花生长、花量及光合作用的影响[J]．园艺学报，6(6):843−843.]

CHEN YM, 2017. Garden dendrology [M]. Beijing: China Forestry Press: 495-496. [陈有民，2017. 园林树木学[M]．北京：中国林业出版社：495−496.]

FANG XY, ZHOU Y, WANG Y, et al., 2020. Effects of different nitrogen，phosphorus and potassium application amounts on the growth, nutrient absorption and distribution of chrysanthemum [J]. J Nanjing Agric Univ, 43(6): 1015-1023. [方馨妍，周杨，汪燕，等，2020.

不同氮、磷、钾用量对菊花生长及养分吸收和分配的影响[J]．南京农业大学学报，43(6):1015−1023.]

GRACIANO C, GOYA F, FRANGI JL, et al., 2006. Fertilization with phosphorus increases soil nitrogen absorption in young plants of *Eucalyptus grandis* [J]. For Ecol Manag, 236(2): 202-210.

GUO C, 2015. The research of rapid propagation technology of six newly introduced varieties of hydrangeas [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology. [郭超，2015. 6 种绣球花新引进品种的快繁技术研究[D]．长沙：中南林业科技大学.]

JIN DX, SUN D, FAN HJ, et al., 2021. Comprehensive evaluation of the main characters of the biennial *Platycodon grandiflorum* based on “3414” fertilization scheme [J]. Soil Fert Sci Chin, 4(2): 156-161. [金冬雪，孙迪，樊桓均，等，2021. 基于“3414”施肥方案的二年生桔梗主要性状的综合评价[J]．中国土壤与肥料，4(2):156−161.]

KATSUYA N, MOTOMU E, MITSUTOMO A, et al., 2017. Sodium potassium root defective1 regulates flowering locus T expression via microRNA156-squamosa promoter binding protein-LIKE3 module in response to potassium conditions [J]. Plant Cell Physiol, 59(2): 404-413.

LI XL, YUAN QF, PENG YJ, et al., 2004. Summary of cultivation technology experiment of *Hydrangea macrophyua*[J]. SW Hortic, 32(6): 19. [李向林，袁启凤，彭玉基，等，2004. 八仙花的栽培技术试验总结[J]. 西南园艺，32(6):19.]

LI T, BI GH, HARKESS RL, et al., 2019. Nitrogen fertilization and irrigation frequency affect hydrangea growth and nutrient uptake in two container types [J]. Hortic Sci, 54(1): 167-174.

LI YH, CHEN S, ZHAO B, et al., 2020. Effect of aluminum stress on growth and physiological characteristics of *Hydrangea* tissue culture seedlings [J]. J Zhejiang Agric For Univ, 37(6): 1064-1070. [李叶华，陈爽，赵冰，2020. 铝胁迫对绣球组培苗生长及生理特性的影响[J]. 浙江农林大学学报，37(6):1064−1070.]

LI YQ, LIU XJ, XU DP, et al., 2021. Growth and foliar nutrition of *Dalbergia odorifera* Seedlings under exponential fertilization [J]. J Trop Crops, 42(02): 481-487. [李毓琦，刘小金，徐大平，等，2021.不同施肥量对降香黄檀苗木生长和叶片养分状况的影响[J]．热带作物学报，42(02):481−487.]

LIN R, DAI ZW, DAI XY, et al., 2021. Evaluation of heat tolerance and screening the index for

the assessment of heat tolerance in cultivars of *Hydrangea* [J]. Chin J Trop Crops, 42(8): 2209-2218.[凌瑞, 戴中武, 代晓雨, 等，2021. 8 个绣球品种耐热性综合评价与耐热指标筛选[J]. 热带作物学报，42(8):2209-2218.]

LIU C, ZHANG NN, HENG Y, et al., 2019. Effects of different fertilization patterns on the growth and flowering of *Rosa chinensis minima* [J]. Tianjin Agric Sci, 25(11): 47-52. [刘晨, 张宁宁, 衡燕, 等，2019. 不同施肥模式对微型月季生长和开花的影响[J]. 天津农业科学，25(11):47-52.]

LU WJ, 2018. The ever-changing hydrangea—*Hydrangea macrophylla* 'Hanatemari'[J]. Flower, (19):22-23. [陆文佳，2018. 百变绣球—— '花手鞠'[J]. 花卉，(19):22-23.]

OLIET JA, TEJADA M, SALIFU KF, et al., 2009. Performance and nutrient dynamics of holm oak (*Quercus ilex* L.) seedlings in relation to nursery nutrient loading and post-transplant fertility[J]. Eur J For Res, 128(3): 253-263.

PAN Y, ZHANG XQ, YE K, et al.，2021. Physiological responses of ten *Hydrangea macrophylla* cultivars to shading and evaluation of strong light tolerance[J]. J Fujian Agric For Univ(Nat Sci Ed), 50(1): 36-48. [潘月，张宪权，叶康，等，2021. 不同八仙花品种对遮阴和强光处理的生理响应与评价[J]. 福建农林大学学报(自然科学版)，50(1):36-48.]

SHRECKHISE JH , OWEN JS , NIEMIERA AX, 2018. Response of *Hydrangea macrophylla* and *Ilex crenata* cultivars to low-phosphorus controlled-release fertilizers[J]. Sci Hortic, 246: 578-588.

TANG J, YANG CD, KANG HM, 2005. Advances in methods of nutrition diagnosis for plants world forestry research[J]. World For Res, 4(6): 45-48. [唐菁，杨承栋，康红梅，2005. 植物营养诊断方法研究进展[J]. 世界林业研究，4(6):45-48.]

THANESHWARI DB, GUPTA YC, 2017. Effect of different doses of nitrogen and potassium on growth and flowering of hydrangea (*Hydrangea macrophylla* Thunb.)[J]. Ecol Environ Conserv, 23(February Suppl.): S108-S299.

TIMMER VR, 1997. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites[J]. New For, 13(1): 279-299.

WANG HR, MA WT, 2012. Effects of different combination ratios of N，P and K fertilizer on growth and resistance of powdery mildew of cut rose[J]. Ningxia J Agric Fore Sci & Technol, 53(9): 49-51. [王华荣, 马文婷，2012. 氮磷钾配比施肥对切花月季生长及抗白粉病的影响

[J]. 宁夏农林科技，53(9)：49−51.]

WANG P, ZHANG L, HAO Y, 2019. The study of quick-acting water-soluble fertilizer for hydrangea cut flower[J]. Hortic Seed, 39(4): 30-35. [王培，张黎，郝杨，2019. 八仙花速效水溶性肥料应用试验研究[J]. 园艺与种苗，39(4)：30−35.]

WANG S, BAO HP, WANG QZ et al., 2014. Effects of N, P, K proportion on vegetative growth and florescence of *Tillandsia stricta* [J]. Chin Agric Sci Bull, 30(16): 221-225. [王姗，鲍华鹏，王全智，等，2014. N, P, K 对铁兰属植物 *Tillandsia stricta* 生长与开花的影响[J]. 中国农学通报, 30(16):221-225.]

WANG SR, CHEN XP, GAO XZ, et al., 2002. Study on simulation of “3414” fertilizer experiments[J]. J Plant Nutr Fert Sci, 4(8): 409-413. [王圣瑞，陈新平，高祥照，等，2002. “3414”肥料试验模型拟合的探讨[J]. 植物营养与肥料学报，4(8)：409−413.]

XUE C, 2020. Gene cloning of foundation study of flower color related transcription factor *HymMYB2* in *Hydrangea macrophylla*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology. [薛超，2020. 绣球花花色相关转录因子 *HymMYB2* 的克隆及功能研究[D]. 长沙：中南林业科技大学.]

YANG JY, ZHAO YJ, ZHANG J, et al., 2020. Study on the technology of postharvest preservation of cut flower of *Hydrangea kuhnert*[J]. Heilongjiang Agric Sci, (2): 61-71. [杨景雅, 赵艳娟，张静，等，2020. 绣球切花采后保鲜技术的研究[J]. 黑龙江农业科学，(2):61−71.]

ZHAO B, 2016. Chinese hydrangea[M]. Beijing: China Forestry Press: 26. [赵冰，2016. 中国八仙花[M]. 北京：中国林业出版社：26.]

ZHANG WJ, LU JW, JIANG ZP, et al., 2009, Effects of N, P, K fertilizer application and recommendation for *Petunia hybrida* Vilm. in pot experiments [J]. Plant Nutr Fert Sci, 15(5): 1147-1153. [张文君，鲁剑巍，蒋志平，等，2009. 盆栽矮牵牛氮、磷、钾肥效应及推荐用量研究[J]. 植物营养与肥料学报，15(5)：1147−1153.]

ZHANG WJ, 2012. Mineral nutrition of *Perunia hybrida* Vilm.: growth, blooming and fertilizer recommendation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University: 3-5. [张文君，2012. 矿质营养对矮牵牛生长开花的影响与推荐施肥研究[D]. 武汉：华中农业大学：3−5.]

ZHAO Z, GONG S, DUAN CL, et al., 2005. Effects of different N, P and K levels on growth and photosynthetic pigment contents of *Erigeron breviscapus* [J]. J Yunnan Agric Univ, 20(5): 676-679. [赵峥，龚苏，段承俐，等，2005. 氮、磷、钾对灯盏花生长发育及光合色素含量

的影响[J]．云南农业大学学报，20(5):676-679.]

ZHU BZ, YANG HX, PAN W, et al., 2020. The DRIS nutrient diagnosis analysis of N, P, K in *Camellia azalea* under different fertilization proportions[J]. Subtrop Plant Sci, 49(1): 21-26. [朱报著，杨会肖，潘文，等，2020. 不同施肥处理杜鹃红山茶 N，P，K 元素的 DRIS 营养诊断[J]．亚热带植物科学，49(1)：21−26.]